

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Simulations and Designs of Near Field Structures for
Optical Communication and Biosensors

光通信とバイオセンサー用近接場光利用デバイスの
数値計算と設計

申 請 者

Xiaomin	WANG
王	曉民

電気・情報生命専攻 誘電体材料研究

2010 年 12 月

近年、近接場光学を始め、極小領域に局在する光の性質を研究する「ナノ・オプティクス」という分野が脚光を浴びる様になっている。近接場光は様々な形で出現し、例えば、金属膜や金属ナノ粒子の表面プラズマ共鳴、異なる物質界面での全反射現象、又は近年盛んになったフォトニックス結晶やメタマテリアルなども近接場と深く関わっている。特に、光の波長よりも小さいナノ領域で存在する近接場光は光の回折限界を打破り、これまで実現出来なかった様々な新規デバイスが提案されるとの期待から、大容量光ストレージ、光通信用デバイス、光微細加工やバイオセンシングなどの分野に活発に研究されている。

一方、このような極小領域での光の振舞いを研究若しくは設計する際、直接観察するのは困難であり、実験でトライ＆エラーで模索するのもコストが高い。従って高度な数値計算が不可欠となっている。本研究では、種々の計算手法を駆使して、ナノ領域の光現象を研究し、理解した上で、新しい機能デバイスを提案・設計した。さらに、シミュレーション結果を実験結果と良く照らし合わせ、フィードバックする事により、デバイスの性能改善に繋げた。本学位論文は、以下に示す7章から構成されている。

第1章“General Introduction”では、はじめにナノ・オプティクスの基礎及び研究現状を紹介する。その後、本研究の手法と各章の内容を紹介する。

第2章“Proposal and Design of a Grating-based Optical Reflection Switch using Phase Change Material”では、書換型光ディスクに広く使われているカルコゲナイド相変化材料の特性を紹介し、その材料の相転移過程で生じる大きな屈折率変化を光スイッチングに応用できる事を示している。相変化材料で構成するgrating形反射式光スイッチを考案するにあたり、スイッチング効率を高めるために、gratingによる回折光の数を減らさなければならないので、gratingの回折条件を詳しく分析し、全反射条件を利用する上で、gratingの周期と幅を巧く設定することで、入射してきた光を反射光と一次反射回折光に閉じ込められる事を見出した。厳密波結合法を用いて、光通信波長帯 $1.5\mu\text{m}$ の光に対して、gratingによる光回折を計算し、提案した光閉じ込め効果や条件を確認できた。更に、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ （GSTと略する）という典型的な相変化材料を使用する事で、その材料の相転移による屈折率変化で、閉じ込められた光を反射光と一次回折光の間で切り換えられる事も発見した。これは、光のオン/オフスイッチや光パスの切り替え器として使えると期待される。さらなる詳しい数値計算により、このデバイスの帯域は広く、ほぼ通信帯域のCバンド全体をカバーできる事も明らかにした。又、gratingの最適な膜厚は約50 nmで、相変化に必要なエネルギーが妥当な値である事、最適な周期と幅はそれぞれ600 nmと300 nmで且回折効率は幅に敏感でないから微細加工しやすい事も確認した。このように、相変化材料を利用する事で、非揮発で省エネの光スイッチは実現可能である事を示した。

第3章“Fabrication and Principle Verification of the Grating-Type Optical Reflection Switch by PCM”では、前章に提案した相変化材料grating形光スイッチ

を電子線リソグラフィで実際に作製した。光デバイスとして基板の透明性が要求されるため、素子をシリカガラス基板上に作るようにした。この場合、EB描画中に電子がガラス基板に溜まり、帯電が問題になる。そこで、導電性ポリマ層をレジストの表面に設けると同時に、ドーズ量を厳密に制御する事で、大面積(1.5×1.5 mm)且均一な grating パターンの作製に成功した。次に、市販のエリプソメータ装置を改造し、素子の Kretschmann 型装着を可能にした上、エリプソの測定できない小角度を自作光検出器でカバーするなどの工夫で、エリプソの優れた角度正確さと制御性を利用しながら、あらゆる角度の光強度を測定できるような環境を整えた。その上で、作製した GST grating デバイスの回折を測定した結果、GST がアモルファスの時、ほぼ計算通りの回折効果が得られ、光の入射角度が 50 度以上になると、全反射光は大きく減り、主に一次回折光になった。一方、GST が結晶の時、こういう特異な回折現象は見られず、普通の鏡のような振る舞いを示した。これで、提案した grating スイッチの原理実証ができた。但し、素子はまだ不完全なため、結晶の場合の光損失は計算よりも大きかった。最後、動的スイッチング実験の準備として、大スポット半導体レーザによる相転移照射実験も行った。アモルファスと結晶に書き込んだマークが加熱により消失する事から、リバーシブルの相転移が実現した事を確認した。今後、このレーザをスキャンさせる事で grating スイッチのような大面積相転移が実現できると大いに期待される。

第 4 章“Photonic Crystal Structures in Titanium Dioxide (TiO_2) and Their Optimal Designs”では、フォトニック結晶(PhC)の材料として、二酸化チタン(TiO_2)が使えるかについて研究した。 TiO_2 は光触媒、センサや太陽電池などに広く使われている非常に重要な材料である。PhCにとっても非常に魅力的な特質を持っている。まず、光通信の波長帯において、 TiO_2 はSiより光損失が一桁も小さい。次に、1000 nm まで非常に小さい膨張率を持ち、激しい環境変動の中でも安定なPhCを期待できる。又、可視光領域でも透明であるため、広帯域に渡ってデバイスを設計可能し、更に、 TiO_2 自身の光触媒作用などを吟味して、斬新なデバイスも期待できる。但し、 TiO_2 の屈折率はSiをはじめ現在よく使われている半導体に比べると相当小さいので、どの程度のPhC特性を発揮できるかに疑問がある。この背景から、私は平面波展開法(PWE)を用いて、 TiO_2 PhCのbandgapについて、系統的に計算した。まず、2次元の理想的なPhCについて、三角と四角と六角格子の穴構造と柱構造のbandgapマップをまとめた。すべての構造でbandgapが存在する事を確認したが、bandgapの大きさで判断する場合、三角格子が有利である事が分かった。又、六角格子において、TEとTM両方のbandgapが豊富で、寸法により両者が重なる完全ギャップが存在する特徴がある。次に、現実に近いスラップ構造においても、ギャップが開く事を確認し、穴サイズの依存性をまとめた。又、PWEで得られたbandgapの光遮断効果を有限差分時間領域法で確かめ、さらに、実現しやすいサンドイッチスラップ構造を提案し、その特性を計算した。最後に、三次元の

Yablonovite構造について完全bandgapの計算を行い「逆Yablonovite構造」でも完全bandgapが存在することをはじめて発見した。又、実際に作製の際円形穴のマスクから出たビームが楕円である事を考慮し、より正確なbandgapを計算し、入射角度依存性も明らかにした。これらの結果は、 TiO_2 が十分なPhC性能を構築できる事を示したと同時に、設計上の重要な指針にもなれる。

第5章“Simulations of Nano-Structure Formation by Swift Heavy Ion Irradiation and Its Optical Scattering”では、重イオン照射によるナノ・サイズの潜トラックの形成メカニズムについて、Thermal Spike Modelを用いて数値計算を行った。実験データとfittingする事により、はじめてルチル単結晶の電子エネルギー拡散長という物性パラメータが得られた。文献に報告されている他の材料の値をまとめた曲線によく合う事も確認した。これを利用して、重イオン照射で TiO_2 に発生する潜トラックのサイズをかなり正確に予測出来る様になった。更に、Thermal Spike Modelを発展させ、物質中に埋め込んだ金属微粒子のイオン照射効果も計算出来る様にした。計算結果により、イオン照射で金属微粒子が伸びる現象の物理解釈が得られた。特に、金ナノ粒子の変形における粒径依存性の実験結果についても矛盾なく説明できた。最後に、このように変形させた金微粒子の光散乱効果を計算し、実験とよく一致した結果が得られた。重イオン照射によるナノ穴・粒子加工はかなりの精度で制御可能である事を示した。

第6章“Designing Evanescent-Field-Coupled Waveguide-Mode Sensors for Biomolecular Sensing”では、第2章の実験構成の変形として、biosensorへの応用について研究した。第2章はgratingの屈折率変化で光をスイッチングさせるが、ここではgratingを簡略化し、代わりにスラップ導波路を導入し、その表面における微小な屈折率変化を光で検出する。これで表面に付着したバイオ分子などをセンシングする訳である。まず、センサの感度を上げるために、反射膜材料の感度への影響を数値計算で纏めた。結果として、貴金属材料では大きな感度が得られるが、一般的な金属では高い感度が期待できない事が分かった。一方、半導体の様な屈折率 n が高く且つ消衰係数 k が小さい材料では、貴金属材料には劣るものの高い感度が期待できる事が分かった。この結果は、安定且高感度なSiベースのセンサ開発に繋がった。又、計算結果は実験結果と非常に良く一致した。更に、熱酸化Si導波路センサの構造について最適設計を行った。Si層と熱酸化層に最適な膜厚が存在する事を明らかにした。最後に、実用化に向かって小型化や低コスト化するために、波長分解型の導波路センサについても解析を行った。光源の全波長帯域に対して、入射角度と各層の膜厚の影響を纏めた。特に、高感度の元は導波モードのオーダが変わる際電磁波が大きく染み出す事に起因することを明らかにした。これらの計算は導波路型biosensorの開発に大きく寄与した。

第7章“Conclusion”では、本研究で得られた知見をまとめた上で、今後の展望などについて述べた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 王 曉民 印

(2010年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文 原著論文	<p>[1] Xiaomin Wang, Masashi Kuwahara, Koichi Awazu, Paul Fons, Junji Tominaga, and Yoshimichi Ohki, "Proposal and Design of a Grating-based Optical Reflection Switch using Phase Change Material," Optics Express, Vol. 17, Issue 19, pp. 16947-16956, 2009.</p> <p>[2] Koichi Awazu, Xiaomin Wang, Tetsuro Komatsubara, Jun Watanabe, Yuki Matsumoto, Shin'ichi Warisawa and Sunao Ishihara, "The fabrication of aligned pairs of gold nanorods in SiO₂ films by ion irradiation," Nanotechnology Vol. 20, no. 32, p. 325303, August 2009.</p> <p>[3] Koichi Awazu, Xiaomin Wang, Makoto Fujimaki, Junji Tominaga, Shinji Fujii, Hirohiko Aiba, Yoshimichi Ohki, and Tetsuro Komatsubara, "Mechanism of elongation of gold or silver nanoparticles in silica by irradiation with swift heavy ions," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 267, no. 6, pp.941-943, March 2009.</p> <p>[4] K. Awazu, X. Wang, M. Fujimaki, J. Tominaga, H. Aiba, Y. Ohki, T. Komatsubara, "Elongation of gold nanoparticles in silica glass by irradiation with swift heavy ions", Physical Review B, vol. 78, pp. 054102-1 - 054102-8, August 2008.</p> <p>[5] X. Wang, M. Fujimaki, and K. Awazu, "Photonic crystal structures in titanium dioxide (TiO₂) and their optimal design", Optics Express, Vol.13, Issue 5, pp.1486-1497, 2005.</p> <p>[6] K. Awazu, X. Wang, M. Fujimaki, H. Imai, T. Kuriyama, and Y. Ohki, "Two and Three-dimensional photonic crystals of titanium dioxide and optical properties", Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices II, 5931, 593106-1-8, 2005.</p> <p>[7] K. Awazu, X. Wang, M. Fujimaki, T. Komatsubara, T. Ikeda and Y. Ohki, "Structure of latent tracks in rutile single crystal of titanium dioxide induced by swift heavy ions", Journal of Applied Physics, Vol.100, pp. 044308-1-5, 2005.</p> <p>[8] K. Awazu, M. Fujimaki, X. Wang, T. Kuriyama, A.Sai, Y. Ohki, and H. Imai, "Fabrication of two- and three-dimensional photonic crystals of titania with submicrometer resolution by deep x-ray lithography", Journal of Vacuum Science & Technology B, 23 (3), pp.934-939, May 2005.</p> <p>[9] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, Y. Koganezawa, Y. Ohki, T. Komatsubara, "Silica-based monolithic sensing plates for waveguide-mode sensors," Optics Express, Vol. 16, Issue 9, pp. 6408-6416, April 2008.</p> <p>[10] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awatsu, J. Tominaga, N. Fukuda, Y. Koganezawa, Y. Ohki, "The Design of Evanescent-Field-Coupled Waveguide-Mode Sensors", Nanotechnology, Vol. 19, pp. 095503-1 - 095503-7, February 2008.</p> <p>[11] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awatsu, J. Tominaga, T. Ikeda, Y. Koganezawa, Y. Ohki, "Biomolecular sensors utilizing waveguide modes excited by evanescent fields", Journal of Microscopy -OXFORD 229 (Pt2), pp. 320-326, February 2008.</p> <p>[12] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, T. Ikeda, Y. Ohki, T. Komatsubara, "Nanoscale pore fabrication for high sensitivity waveguide mode biosensors", Microelectronics Engineering 84, pp. 1685-1689, 2007.</p>
講演 国際会議 (主要なもののみ記載)	<p>[1] X. Wang, M. Kuwahara, M. Fujimaki, H. Kawashima, H. Tsuda, Y. Ohki, Fabrication of a grating with phase change material and its static optical switching performance, 36th international conference on Micro & Nano Engineering (MNE 2001), p.261, Genoa (Italy), September 19-22, 2010.</p> <p>[2] X. Wang, et al, "Proposal and principle verification of a new grating-type optical reflection switch based on phase change material", 20th Symposium on Phase Change Optical Information Storage (PCOS) 2008, Vol.20, pp.44-47, December 4-5, 2008, Shizuoka (Japan).</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国内発表 （主要な もののみ 記載）	<p>[1] <u>Xiaomin Wang</u>, Robert E. Simpson, Masashi Kuwahara, Paul Fons, Junji Tominaga, and Yoshimichi Ohki, Numerical Modeling of the thermal evolution in a phase change material thin film under the irradiation of a pulsed laser, Comsol Conference 2009, E-5, Tokyo, December 4, 2009.</p> <p>[2] <u>王 曉民</u>、桑原 正史、栗津 浩一、Paul Fons、富永 淳二、大木 義路、「相変化材料を用いたグレーティング型光スイッチの設計と原理実証」、ナノオプティクス研究グループ 第 18 回研究討論会、2009 年 07 月 23 日、京都大学宇治キャンパス。</p> <p>[3] 野村 健一、大木義路、藤巻 真、<u>王 曉民</u>、栗津 浩一、小松原 哲郎、「高速重イオン照射により絶縁体中に生じる構造変化の機構と微細加工への応用」、第 23 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2010 年 07 月 03 日、東京大学。</p> <p>[4] 野村 健一、大木義路、藤巻 真、<u>王 曉民</u>、栗津 浩一、小松原 哲郎、「潜トラックのエッチングで生じるナノ孔のサイズの決定要因」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 03 月 20 日、神奈川県（東海大学）。</p> <p>[5] 栗津 浩一、<u>王 曉民</u>、小松原哲郎、「シリカガラス中に並べた金ナノロッドペア構造による局在表面プラズモン共鳴」、第 50 回ガラスおよびフォトンクス材料討論会、2009 年 10 月 30 日、京都大学。</p> <p>[6] 藤巻 真、SubashChandra Bose Gopinath、<u>王 曉民</u>、栗津 浩一、野村 健一、佐藤 一樹、加藤 貴史、大木義路、「導波モードを用いた着色分子の高感度検出」、秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会、2009 年 09 月 08 日、富山大学。</p> <p>[7] <u>王 曉民</u>、桑原 正史、栗津 浩一、富永 淳二、「相変化材料を用いたグレーティング型光スイッチの提案と原理実証」、第 69 回応用物理学学会学術講演会、3a-ZD-7、予稿集Vol.3、pp. 1028、2008。</p>
その他 特許	<p>[1] 桑原 正史、<u>王 曉民</u>、栗津 浩一、富永 淳二、「光路切替素子及び光路切替方法」、特願 2008-208449、2008。</p>
その他 (本研究とは直接 関係のない業績) (原著論文) (主要な もののみ 記載)	<p>[1] R. E. Simpson, P. Fons, <u>X. Wang</u>, A. V. Kolobov, T. Fukaya, and J. Tominaga. "Non-melting super-resolution near-field apertures in Sb-Te alloys." Applied Physics Letters, Vol.97, no. 16, p.161906, 2010.</p> <p>[2] Y. Ikuma, Y. Shoji, M. Kuwahara, <u>X. Wang</u>, K. Kintaka, H. Kawashima, D. Tanaka, and H. Tsuda. "Reversible optical gate switching in Si wire waveguide integrated with Ge₂Sb₂Te₅ thin film." Electronics Letters, vol. 46, no. 21, p. 1460, 2010.</p> <p>[3] Y. Ikuma, Y. Shoji, M. Kuwahara, <u>X. Wang</u>, K. Kintaka, H. Kawashima, D. Tanaka, and H. Tsuda, "Small-sized optical gate switch using Ge₂Sb₂Te₅ phase-change material integrated with silicon waveguide," Electronics Letters Vol.46, no. 5, pp. 368-369, March 4, 2010.</p> <p>[4] K. Nomura, Y. Ohki, M. Fujimaki, <u>X. Wang</u>, K. Awazu and T. Komatsubara, "Plasmonic activity on gold nanoparticles embedded in nanopores formed in a surface layer of silica glass by swift-heavy-ion irradiation," Nanotechnology Vol. 20, no. 47, p. 475306 (11, 2009).</p> <p>[5] Qian Liu, <u>Xiaomin Wang</u>, Sihai Cao, Cuanfei Guo, "Effect of Recorded-Dot Size on Readout Signal in Nano-Optical Storage," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 9, No. 2, pp. 746-748, February 2009.</p> <p>[6] M. Fujimaki, Y. Iwanabe, C. Rockstuhl, <u>X. Wang</u>, K. Awazu, J. Tominaga, "Surface-Enhanced Raman Scattering by Hemi-Ellipsoidal Ag Nanoparticles Generated from Silver-Oxide Thin Films", Japanese Journal of Applied Physics 46 (44), pp. L1080-L1082, November 2007.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>[7] K. Asagawa, Y. Sugimoto, Y. Watanabe, N. Ozaki, A. Mizutani, Y. Takata, Y. Kitagawa, H. Ishikawa, N. Ikeda, K. Awazu, <u>X. Wang</u>, A. Watanabe, S. Nakamura, S. Ohkouchi, K. Inoue, M. Kristensen, O. Sigmund, P. Borel, “Photonic crystal and quantum dot technologies for all-optical switch and logic device”, <i>New Journal of Physics</i>, 8 (208), pp. 1-26, 2006.</p> <p>[8] <u>X. Wang</u>, D. Kunimatsu, T. Hasegawa and A. Suzuki, “Wide-band dispersion compensation for 1000-km single-mode fiber by midway spectral inversion using cascaded nonlinearities in LiNbO₃ waveguide”, <i>IEICE Trans. Electron.</i>, vol. E87-C, No. 7, pp. 1097-1099, 2004.</p> <p>[9] T. Hasegawa, <u>X. Wang</u> and A. Suzuki, “Retiming of picosecond pulses by a cascaded second-order nonlinear process in quasi-phase-matched LiNbO₃ waveguides”, <i>Optics Letters</i>, Vol. 29, Issue 23, Page 2776, December 2004.</p> <p>[10] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Morita, <u>X. Wang</u>, T. Hasegawa and A. Suzuki, “Tunable Dispersion and Dispersion Slope Compensator Based on Two Twin Chirped FBGs with Temperature Gradient for 160Gb/s Transmission”, <i>IEICE Trans. Electron.</i>, vol.E87-C, No. 7, pp. 1100-1105, 2004.</p> <p>[11] Y. Takushima, T. Douke, <u>X. Wang</u>, K. Kikuchi, “Dispersion tolerance and transmission distance of a 40-Gb/s dispersion management soliton transmission system”, <i>IEEE, Journal of Lightwave Technology</i>, Vol. 20, No. 3, pp. 360-367, March 2002.</p> <p>[12] D. Kunimatsu, C. Q. Xu, M. D. Pelusi, <u>X. Wang</u>, K. Kikuchi, and A. Suzuki, “Sub-picosecond pulse transmission over 144 km using midway optical phase conjugation via a cascaded second-order process in a LiNbO₃ waveguide”, <i>IEEE Photonics Technology Letters</i>, Vol. 12, No.12, pp. 1621-1623, December 2000.</p> <p>[13] M. D. Pelusi, <u>X. Wang</u>, F. Futami, K. Kikuchi, and A. Suzuki, “Fourth-Order Dispersion Compensation for 250-fs pulse transmission over 139km Optical Fibre”, <i>IEEE Photonics Technology Letters</i>, Vol.12, No.7, July 2000.</p> <p>[14] <u>Xiaomin Wang</u>, Kazuro Kikuchi, and Yuichi Takushima, “ Analysis of Dispersion-Managed Optical Fiber Transmission System and Performance Restrained from Third-Order Dispersion ”, <i>IEICE Trans. Commun.</i>, Vol.E82-B, No.8, pp.1141-1147/<i>IEICE Trans. Electron.</i>, Vol.E82-C, No.8, pp. 1407-1413, August 1999.</p> <p>[15] Yuichi Takushima, <u>Xiaomin Wang</u> and Kazuro Kikuchi, “Transmission of 3-ps dispersion-managed soliton pulses over an 80-km distance under the influence of third-order dispersion”, <i>Electronics Letters</i>, Vol.35, No.9, pp.739-740, 29th April 1999.</p>
(特許)	<p>[1] 中村 滋、<u>王 曉民</u>、浅川 潔、渡邊 晃、「光論理回路」、特願 2007-001802、2007。</p> <p>[2] 栗津 浩一、<u>王 曉民</u>、「周期的な構造を有する結晶構造体」特願 2004 - 363685, 2004。</p> <p>[3] <u>王 曉民</u>、鈴木 明、「光ファイバー伝送路」、出願番号（特願 2001-210291）, 2001。</p>
(著書)	<p>[1] K. Asakawa, Y. Sugimoto, N. Ikeda and Y. Watanabe, N. Ozaki, Y. Takata, Y. Kitagawa, S. Ohkouchi and S. Nakamura, A. Watanabe, <u>X. Wang</u>, “Chapter 9 Photonic crystal all-optical switches”, <i>Optical Switches: Materials and Design</i>, Editor: Baojun Li and Soo Jin Chua, CRC Press/Woodhead Publishing Limited, 2010 (to be published).</p> <p>[2] Yuichi Takushima, <u>Xiaomin Wang</u> and Kazuro Kikuchi, “Propagation of 3-ps Dispersion-Managed Soliton Pulse under the Influence of Third-Order Dispersion”, <i>Massive WDM and TDM Soliton Transmission Systems</i>, Editor: Akira Hasegawa, Kluwer Academic Publisher, ISBN 0-7923-6517-8, September 2000.</p>
(国際会議) (主要なもののみ記載)	<p><u>X. Wang</u>, D. Kunimatsu, A. Suzuki and K. Kikuchi, “Restrictions in Long Distance 160-Gb/s Midway Optical Phase Conjugation transmission”, <i>The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'02)</i>, CThO45, California, USA, May 19-24, 2002.</p>